

**SISTEM PENGUKURAN KARAKTERISTIK BAHAN AKUSTIK  
MENGUNAKAN TABUNG IMPEDANSI SISTEM EMPAT MIKROFON  
DENGAN MATRIKS PINDAH (BAGIAN PERANGKAT KERAS)**

Oleh

Teguh Santoso

NIM: 612011031



Skripsi

Untuk melengkapi salah satu syarat memperoleh

Gelar Sarjana Teknik

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer

Universitas Kristen Satya Wacana

Salatiga

Januari 2016



## PERNYATAAN PERSETUJUAN AKSES

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : TEGUH SANTOSO  
NIM : 612011031 Email : teguh93\_santoso@yahoo.com  
Fakultas : TEKNIK ELEKTRONIKA & KOMPUTER Program Studi : TEKNIK ELEKTRO  
Judul tugas akhir : SISTEM PENGUKURAN KARAKTERISTIK BAHAN AKUSTIK MENGGUNAKAN  
TABUNG IMPEDANSI SISTEM EMPAT MIKROFON DENGAN MATRIKS PINDAH  
(BAGIAN PERANGKAT KERAS)

Dengan ini saya menyerahkan hak *non-eksklusif*\* kepada Perpustakaan Universitas – Universitas Kristen Satya Wacana untuk menyimpan, mengatur akses serta melakukan pengelolaan terhadap karya saya ini dengan mengacu pada ketentuan akses tugas akhir elektronik sebagai berikut (beri tanda pada kotak yang sesuai):

- ☒ a. Saya mengizinkan karya tersebut diunggah ke dalam aplikasi Repositori Perpustakaan Universitas, dan/atau portal GARUDA
- ☐ b. Saya tidak mengizinkan karya tersebut diunggah ke dalam aplikasi Repositori Perpustakaan Universitas, dan/atau portal GARUDA\*\*

\* Hak yang tidak terbatas hanya bagi satu pihak saja. Pengajar, peneliti, dan mahasiswa yang menyerahkan hak non-eksklusif kepada Repositori Perpustakaan Universitas saat mengumpulkan hasil karya mereka masih memiliki hak copyright atas karya tersebut.

\*\* Hanya akan menampilkan halaman judul dan abstrak. Pilihan ini harus dilampiri dengan penjelasan/ alasan tertulis dari pembimbing TA dan diketahui oleh pimpinan fakultas (dekan/kaprodi).

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Salatiga, 3 FEBRUARI 2016

TEGUH SANTOSO

Tanda tangan & nama terang mahasiswa

Mengetahui,

Natias H. R. Budhanta

Tanda tangan & nama terang pembimbing I

Gunnawan D.

Tanda tangan & nama terang pembimbing II



### PERNYATAAN TIDAK PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : TEGUH SANTOSO  
NIM : 612011031 Email : teguh93\_santoso@yahoo.com  
Fakultas : TEKNIK ELEKTRONIKA & KOMPUTER Program Studi : TEKNIK ELEKTRO  
Judul tugas akhir : SISTEM PENGUKURAN KARAKTERISTIK BAHAN AKUSTIK MENGGUNAKAN  
TABUNG IMPEDANSI SISTEM EMPAT MIKROFON DENGAN MATRIKS  
PINDAH (BAGIAN PERANGKAT KERAS)  
Pembimbing : 1. DR. MATIAS H. W. BUDHANTHO  
2. GUNAWAN DEWANTORO M.SC.ENG

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Hasil karya yang saya serahkan ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar kesarjanaan baik di Universitas Kristen Satya Wacana maupun di institusi pendidikan lainnya.
2. Hasil karya saya ini bukan saduran/terjemahan melainkan merupakan gagasan, rumusan, dan hasil pelaksanaan penelitian/implementasi saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan pembimbing akademik dan narasumber penelitian.
3. Hasil karya saya ini merupakan hasil revisi terakhir setelah diujikan yang telah diketahui dan disetujui oleh pembimbing.
4. Dalam karya saya ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali yang digunakan sebagai acuan dalam naskah dengan menyebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.

Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya. Apabila di kemudian hari terbukti ada penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya saya ini, serta sanksi lain yang sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Universitas Kristen Satya Wacana.

1956

Salatiga, 3 FEBRUARI 2016



TEGUH SANTOSO



**SISTEM PENGUKURAN KARAKTERISTIK BAHAN AKUSTIK  
MENGUNAKAN TABUNG IMPEDANSI SISTEM EMPAT MIKROFON  
DENGAN MATRIKS PINDAH (BAGIAN PERANGKAT KERAS)**

Oleh  
Teguh Santoso  
NIM: 612011031

Skripsi ini telah diterima dan disahkan

Untuk melengkapi salah satu syarat memperoleh

Gelar Sarjana Teknik

dalam

Konsentrasi Teknik Telekomunikasi

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer

Universitas Kristen Satya Wacana

Salatiga

1956

Disahkan oleh :

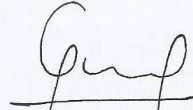
Pembimbing I



Dr. Matias H.W. Budhianto

Tanggal : 8 Februari 2016

Pembimbing II



Gunawan D, M.Sc.Eng

Tanggal : 1/2/2016

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Saya, yang bertanda tangan di bawah ini:

NAMA : Teguh Santoso

NIM : 612011031

JUDUL SKRIPSI : Sistem Pengukuran Karakteristik Bahan Akustik  
Menggunakan Tabung Impedansi Sistem Empat  
Mikrofon dengan Matriks Pindah (Bagian Perangkat  
Keras).

Menyatakan bahwa skripsi tersebut di atas bebas plagiat. Apabila ternyata ditemukan unsur plagiat di dalam skripsi saya, maka saya bersedia mendapatkan sanksi apapun sesuai aturan yang berlaku.

Salatiga, Januari 2016



Teguh Santoso

# **Sistem Pengukuran Karakteristik Bahan-Bahan Akustik Menggunakan Tabung Impedansi Sistem Empat Mikrofon dengan Matriks Pindah (Bagian Perangkat Keras)**

Teguh Santoso  
Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro  
Universitas Kristen Satya Wacana  
Salatiga  
Desember 2015

Pembimbing :  
Dr. Matias H. W. Budhiantho  
Gunawan Dewantoro M.Sc.Eng

## **INTISARI**

Perangkat keras tabung impedansi sistem empat mikrofon (TIS4M) yang terdiri dari tabung impedansi, mikrofon, penguat sinyal mikrofon, penyuara, dan penguat daya, serta sensor suhu dan tekanan udara. Perangkat TIS4M bertujuan untuk mengukur karakteristik bahan akustik seperti koefisien serapan bunyi, rerugi transmisi, bilangan gelombang propagasi, dan impedansi karakteristik dengan jangkauan pengukuran 100-8000 Hz. Spesifikasi tabung impedansi dengan jangkauan frekuensi kerja dari 100-8000 Hz, mikrofon yang identik dari 100-5500 Hz, penguat sinyal mikrofon, penguat daya, dan penyuara dengan tanggapan frekuensi 100-8000 Hz, serta sensor suhu dan udara dengan ketelitian  $\pm 1$  °C dan  $\pm 1,5$  kPa. Hasil pengukuran koefisien serap dan rerugi transmisi yang didapat mendekati hasil pengukuran dari tabung impedansi B&K 4206. Untuk tabung kecil, hasil pengukuran bilangan gelombang propagasi dan impedansi karakteristik terdapat galat ketika bahan uji yang memiliki ketebalan melebihi diameter tabung kecil.

## ABSTRACT

Hardware of impedance tube system of four microphones (TIS4M) consisting of impedance tube, microphone, microphone's signal amplifier, loudspeaker, power amplifier, and air's temperature and pressure sensors. TIS4M is used to measure acoustic characteristics of materials such as sound absorption coefficient, transmission loss, propagation wave number, and characteristic impedance of materials within frequency range from 100 to 8000 Hz. The specifications of TIS4M are impedance tube with working frequency range from 100 to 8000 Hz, identical microphones from 100 to 5500 Hz, microphone's signal amplifier, power amplifier, and loudspeaker with frequency response from 100 to 8000 Hz, and air temperature and pressure sensors with accuracy of  $\pm 1$  °C and  $\pm 1.5$  kPa. The measurement results of absorption coefficient and transmission loss were obtained approaching to measurement results of the impedance tube B&K 4206T. For small tube, the measurement results of propagation wave number and characteristic impedance had an error when the material had a thickness exceeding the small tube's diameter.



## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, berkah, hidayah, dan inayahNya yang selalu menyertai penulis selama menempuh pendidikan dari awal hingga penyelesaian tugas akhir sebagai syarat kelulusan di Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer Universitas Kristen Satya Wacana.

Pelaksanaan tugas akhir ini merupakan kesempatan yang berharga bagi penulis untuk menuangkan ide atau kreatifitas yang bermanfaat bagi perkembangan diri penulis maupun sumbangan ilmu pengetahuan di Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer.

Pada kesempatan ini penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang baik secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini:

1. Tuhan Yesus yang selalu memberkati, menyertai, dan memberikan segala yang terbaik bagi penulis selama menempuh pendidikan S1 di FTEK UKSW hingga selesai.
2. Papa Rudyanto Candrayana, Mama Sicilia Mutiarni, Kakak Merryana Lestari, dan Kakak ipar Agustinus Fritz tercinta sebagai keluarga yang telah selalu mendidik, mendukung, dan mendoakan penulis.
3. Bapak Dr. Matias H.W. Budhiantho dan Bapak Gunawan D, M.Sc.Eng sebagai pembimbing I dan pembimbing II yang telah membimbing dan memberikan saran kepada penulis selama mengerjakan tugas akhir ini.
4. Keluarga besar 2011, terutama Joe Boby Soegiarto sebagai rekan saya dalam mengerjakan tugas akhir, Oei Kurniawan Utomo, Rudy Santoso, Kurnia Sanjaya, Chel Rachel, Joel Patra, Silvester Kristian, dan Marcel Frans Wijadi sebagai teman seperjuangan yang selalu memberi dukungan kepada penulis.
5. Seluruh staff dosen, karyawan dan laboran FTEK yang memfasilitasi penulis selama menempuh pendidikan S1 di FTEK UKSW.
6. Teman-teman FTEK, teman-teman AME, teman-teman EASE, dan teman-teman dari fakultas lain yang telah memberikan dukungan kepada penulis selama menempuh pendidikan S1 di FTEK UKSW.



7. Berbagai pihak yang tidak dapat dituliskan satu persatu, penulis mengucapkan terima kasih.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kata “sempurna”, oleh karena itu penulis membuka saran untuk menerima kritik dan saran dari pembaca sehingga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi kemajuan pendidikan FTEK UKSW.

Salatiga, Januari 2016

Penulis



## DAFTAR ISI

INTISARI	i
ABSTRACT.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR SIMBOL	xiii
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Tujuan, Batasan Masalah, dan Spesifikasi .....	2
1.3. Sistematika Penulisan.....	3
BAB II. DASAR TEORI TIS4M.....	5
2.1. Gelombang Bunyi dalam TIS4M .....	6
2.2. Perangkat Keras Sistem Pengukur TIS4M.....	9
2.2.1. Tabung Impedansi .....	9
2.2.2. Mikrofon dan Peletakannya .....	11
2.2.3. Penguat Sinyal Mikrofon .....	15
2.2.4. Penyuaara.....	17
2.2.5. Penguat Daya .....	18
2.2.6. Sensor Suhu dan Tekanan Udara .....	20
2.3. Karakteristik Bahan-Bahan Akustik .....	21
2.3.1. Koefisien Serap Bunyi .....	21
2.3.2. Rerugi Transmisi .....	25
2.3.3. Impedansi Karakteristik dan Bilangan Gelombang Propagasi.....	27
2.4. Tabung Impedansi B&K 4206 .....	29
BAB III. PERANCANGAN PERANGKAT KERAS TIS4M .....	31

3.1.	Perancangan Tabung Impedansi .....	32
3.1.1.	Perancangan Tabung Impedansi Besar (100-1600 Hz).....	32
3.1.2.	Perancangan Tabung Impedansi Kecil (500-8000 Hz) .....	35
3.2.	Pemilihan Mikrofon .....	37
3.2.1.	Diameter Mikrofon.....	37
3.2.2.	Peletakkan Celah Mikrofon pada Tabung Impedansi .....	38
3.2.3.	Peletakkan Mikrofon Terhadap Bahan Uji pada Tabung Impedansi .....	41
3.2.4.	Peletakkan Mikrofon Terhadap Penyuar pada Tabung Impedansi .....	41
3.3.	Perancangan Penguat Sinyal Mikrofon .....	43
3.3.1.	Perancangan Tapis Lolos Atas Butterworth Orde 2 Aktif .....	44
3.3.2.	Perancangan Tapis Lolos Bawah Butterworth Orde 2 Aktif .....	46
3.3.3.	Penguatan Total Penguat Sinyal Mikrofon .....	47
3.4.	Perancangan Penyuar .....	48
3.5.	Penentuan Penguat Daya.....	52
3.6.	Penentuan Sensor Suhu dan Tekanan Udara.....	53
<b>BAB IV. PENGUJIAN PERANGKAT KERAS TIS4M</b>		<b>56</b>
4.1.	Pengujian Tabung Impedansi .....	56
4.1.1.	Pengujian Gelombang Bidang pada Tabung Impedansi .....	56
4.1.2.	Pengujian Terminasi Penyerap Sempurna .....	59
4.2.	Pengujian Penyuar.....	61
4.2.1.	Simulasi Penyuar .....	61
4.2.2.	Pengukuran Jarak Jauh Penyuar .....	62
4.2.3.	Pengukuran Jarak Dekat Penyuar.....	64
4.2.4.	Pengukuran Total Penyuar .....	66
4.3.	Pengujian Mikrofon Kondenser FBELE FBMT1210 .....	67
4.4.	Pengujian Penguat Sinyal Mikrofon .....	70
4.4.1.	Simulasi Penguat Sinyal Mikrofon .....	70
4.4.2.	Pengukuran Elektrik Penguat Sinyal Mikrofon .....	72
4.5.	Pengujian Penguat Daya .....	75
4.5.1.	Pengukuran Daya Maksimal .....	76
4.5.2.	Pengukuran Tanggapan Frekuensi Penguat Daya.....	76
4.5.3.	Pengukuran THD Penguat Daya .....	78



4.5.4.	Pengukuran SNR Penguat Daya.....	79
4.6.	Pengujian Sensor Suhu dan Tekanan Udara .....	81
4.7.	Pengujian Perangkat Keras Gabungan .....	82
BAB V. PENGUJIAN SISTEM GABUNGAN TIS4M		86
5.1.	Kalibrasi Perangkat Pengukur TIS4M .....	86
5.2.	Hasil Pengukuran Bahan Akustik .....	88
5.2.1.	Hasil Pengukuran Koefisien Serapan Bunyi .....	88
5.2.1.a.	Analisis Perbandingan Hasil Pengukuran Koefisien Serapan Bunyi dari TIS4M, Sistem 2 Mikrofon, dan <i>Reverberation Room</i> (Data Pabrik).....	93
5.2.1.b.	Analisis Perbandingan Hasil Pengukuran Koefisien Serapan Bunyi Berdasarkan Ketebalan Bahan Uji .....	96
5.2.1.c.	Analisis Perbandingan Hasil Pengukuran Koefisien Serapan Bunyi Berdasarkan Kepadatan Bahan Uji .....	98
5.2.1.d.	Analisis Perbandingan Hasil Pengukuran Koefisien Serapan Bunyi milik TIS4M dan B&K 4206 .....	99
5.3.	Analisis Hasil Pengukuran Rerugi Transmisi Bunyi .....	100
5.4.	Analisis Hasil Pengukuran Bilangan Gelombang Propagasi .....	104
5.5.	Analisis Hasil Pengukuran Impedansi karakteristik .....	107
5.6.	Analisis Pengaruh Sensor Suhu dan Tekanan Udara Terhadap Ketelitian Pengukuran .....	111
5.7.	Perbandingan Hasil Pengukuran Perangkat Pengukur TIS4M, 2 Mikrofon, dan B&K 4206.....	112
5.8.	Perbandingan Harga TIS4M dan B&K 4206T.....	113
BAB VI. PENUTUP		114
6.1.	Kesimpulan .....	114
6.2.	Saran .....	117
DAFTAR PUSTAKA.....		118
LAMPIRAN.....		121

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Perbedaan aliran udara pada diameter tabung besar (kiri) dan kecil (kanan)	6
Gambar 2.2. Tabung impedansi sistem 4 mikrofon (TIS4M).....	7
Gambar 2.3. Konstruksi dasar mikrofon kondenser.....	12
Gambar 2.4. Penguat kaskade.....	15
Gambar 2.5. Rangkaian tapis lolos bawah orde 2 aktif.....	16
Gambar 2.6. Rangkaian tapis lolos atas orde 2 aktif.....	16
Gambar 2.7. Grafik faktor redaman terhadap tanggapan frekuensi.....	17
Gambar 2.8. Perbandingan koefisien serap bunyi dengan metode tabung impedansi (atas) dan ruang kerdam (bawah).....	24
Gambar 2.9. Rerugi transmisi bahan.....	25
Gambar 2.10. Tabung impedansi B&K 4206.....	30
Gambar 3.1. Susunan perangkat pengukur karakteristik bahan akustik dengan sistem TIS4M.....	31
Gambar 3.2. Pemegang bahan uji.....	34
Gambar 3.3. Koefisien serap terminasi penyerap sempurna 100-1600 Hz ( <i>Glaswool</i> 70 cm).....	34
Gambar 3.4. Koefisien serap terminasi penyerap sempurna 500-8000 Hz ( <i>Glaswool</i> 70 cm).....	36
Gambar 3.5. Sambungan peralihan tabung besar ke kecil.....	37
Gambar 3.6. Mikrofon kondenser FBELE FBMT1210 ¼ inci.....	38
Gambar 3.7. Perancangan tabung impedansi besar (100-1600 Hz).....	42
Gambar 3.8. Perancangan tabung impedansi kecil (500-8000 Hz).....	42
Gambar 3.9. Susunan sistem penguat sinyal mikrofon.....	44
Gambar 3.10. Tapis lolos atas Butterworth orde 2 aktif.....	45
Gambar 3.11. Tapis lolos bawah Butterworth orde 2 aktif.....	47
Gambar 3.12. Rangkaian penguat sinyal mikrofon.....	48

Gambar 3.13. Tanggapan frekuensi dan impedansi Visaton FRS 8.....	49
Gambar 3.14. Hasil pengukuran <i>Thiele Small Parameter</i> Visaton FRS 8.....	50
Gambar 3.15. Grafik $Q_{tc}$ terhadap frekuensi penggal dan tanggapan frekuensi.....	50
Gambar 3.16. Sistem Penyuaara.....	52
Gambar 3.17. Konfigurasi sistem sensor.....	53
Gambar 3.18. Pengaplikasian sensor pada sistem TIS4M.....	53
Gambar 3.19. (a) Susunan mikrokontroller dan LCD, (b) Sensor HP03, (c) Pengaplikasian sensor pada tabung impedansi.....	53
Gambar 3.20. Perangkat TIS4M 100-1600 (kiri), 500-8000 (kanan) .....	54
Gambar 4.1. Susunan pengujian gelombang bidang pada tabung impedansi.....	57
Gambar 4.2. Koherensi gelombang bidang setiap lokasi mikrofon (tabung besar).....	58
Gambar 4.3. Koherensi gelombang bidang pada setiap lokasi mikrofon (tabung kecil).....	58
Gambar 4.4. Susunan pengujian terminasi tabung impedansi.....	59
Gambar 4.5. Hasil pengujian koherensi gelombang pada tabung besar.....	60
Gambar 4.6. Hasil pengujian koherensi gelombang pada tabung besar.....	60
Gambar 4.7. Hasil simulasi tanggapan frekuensi penyuaara.....	61
Gambar 4.8. Susunan pengukuran akustik jarak jauh.....	62
Gambar 4.9. Tanggapan impuls penyuaara.....	63
Gambar 4.10. Tanggapan frekuensi penyuaara berdasarkan pengukuran jarak jauh.....	64
Gambar 4.11. Susunan pengukuran akustik jarak dekat.....	65
Gambar 4.12. Tanggapan frekuensi penyuaara berdasarkan pengukuran jarak dekat.....	65
Gambar 4.13. Tanggapan frekuensi penyuaara.....	66
Gambar 4.14. Susunan pengukuran tanggapan frekuensi dan fase mikrofon FBELE FBMT1210.....	67
Gambar 4.15. Hasil tanggapan frekuensi mikrofon 1 (merah) dan 2 (biru).....	68
Gambar 4.16. Hasil pengukuran fase mikrofon 1 (merah) dan 2 (putih).....	68
Gambar 4.17. Hasil pengukuran tanggapan frekuensi mikrofon 1 (merah), mikrofon 2 (putih), dan mikrofon CLIO (biru).....	69
Gambar 4.18. Simulasi tanggapan frekuensi tapis lolos atas menggunakan Circuit Maker 2000.....	71
Gambar 4.19. Simulasi tanggapan frekuensi tapis lolos bawah menggunakan Circuit Maker 2000.....	71



Gambar 4.20. Susunan pengukuran derau penguat sinyal mikrofon.....	72
Gambar 4.21. Susunan pengukuran sinyal keluaran dan tanggapan frekuensi mikrofon.....	73
Gambar 4.22. SNR penguat sinyal mikrofon (kiri = kanal 1) & (kanan = kanal 2).....	73
Gambar 4.23. Tanggapan frekuensi penguat sinyal mikrofon.....	74
Gambar 4.24. Susunan pengujian penguatan tegangan penguat sinyal mikrofon.....	75
Gambar 4.25. Hasil pengukuran penguatan tegangan penguat sinyal mikrofon.....	75
Gambar 4.26. Susunan pengukuran daya maksimal penguat daya.....	76
Gambar 4.27. Susunan pengukuran tanggapan frekuensi penguat daya.....	77
Gambar 4.28. Hasil pengukuran tanggapan frekuensi penguat daya.....	77
Gambar 4.29. Susunan pengukuran THD penguat daya.....	78
Gambar 4.30. Grafik pengukuran THD penguat daya pada 100-8000 Hz.....	79
Gambar 4.31. Susunan pengukuran derau penguat daya.....	79
Gambar 4.32. Susunan pengukuran sinyal keluaran penguat daya.....	80
Gambar 4.33. Grafik pengukuran SNR penguat daya terhadap frekuensi.....	80
Gambar 4.34. Pengujian sensor DT-Sense HP03 terhadap Thermocouple Fluke 179.....	81
Gambar 4.35. Perbandingan data suhu sensor DT-Sense HP03 dan Thermocouple Fluke 179 .....	81
Gambar 4.36. Susunan pengujian perangkat keras TIS4M secara keseluruhan.....	82
Gambar 4.37. Tabung besar (a) Mikrofon 1, (b) Mikrofon 2, (c) Mikrofon 3, (d) Mikrofon 4 .....	83
Gambar 4.38. Tabung kecil (a) Mikrofon 1, (b) Mikrofon 2, (c) Mikrofon 3, (d) Mikrofon 4 .....	84
Gambar 5.1. Susunan kalibrasi sistem TIS4M.....	86
Gambar 5.2. Koefisien serap dengan bahan uji plat besi (kiri : tabung besar ; kanan : tabung kecil).....	87
Gambar 5.3. Perbedaan perambatan gelombang bidang berdasarkan diameter tabung.....	87
Gambar 5.4. Susunan pengukuran bahan akustik pada tabung besar (100-1600 Hz).....	89
Gambar 5.5. Susunan pengukuran bahan akustik pada tabung kecil (500-8000 Hz).....	89
Gambar 5.6. Perbandingan koefisien serapan bunyi tabung besar (a) Rockwool ABR850 ; (b) Glaswool AB4850 ; (c) Glaswool AB4825 ; (d) Glaswool AB3250 (Kiri : Sistem TIS4M ; Kanan : Sistem dua mikrofon).....	90

Gambar 5.7. Perbandingan koefisien serapan bunyi tabung kecil (a) Rockwool ABR850 ; (b) Glaswool AB4850 ; (c) Glaswool AB4825 ; (d) Glaswool AB3250 (Kiri : Sistem TIS4M ; Kanan : Sistem dua mikrofon).....	92
Gambar 5.8. Perbandingan koefisien serapan bunyi dari pengukuran tabung impedansi (atas) dan <i>reverberation room</i> (bawah).....	95
Gambar 5.9. Pengaruh ketebalan bahan terhadap koefisien serap bunyi.....	97
Gambar 5.10. Perbandingan nilai koefisien serap bunyi berdasarkan ketebalan bahan.....	97
Gambar 5.11. Perbandingan nilai koefisien serap bunyi berdasarkan kepadatan bahan.....	98
Gambar 5.12. Perbandingan koefisien serap terhadap kepadatan bahan.....	99
Gambar 5.13. Hasil pengukuran koefisien serap TIS4M dan B&K 4206.....	100
Gambar 5.14. Perbandingan antara hasil pengukuran rerugi transmisi dan perhitungan teori pada tabung besar (kiri = AB4850 & kanan = AB3250).....	101
Gambar 5.15. Perbandingan rerugi transmisi bunyi hasil perhitungan dan hasil pengukuran bahan Glaswool AB4850 pada tabung kecil .....	102
Gambar 5.16. Bilangan gelombang propagasi bahan Glaswool AB 4850 pada tabung kecil bagian nyata dan bagian imajiner.....	102
Gambar 5.17. Perbandingan hasil rerugi transmisi bahan AB4850 dan bahan AB4825. ....	103
Gambar 5.18. Perbandingan nilai rerugi transmisi Glaswool AB 3250 hasil pengukuran TIS4M dan B&K 4206 pada frekuensi 100-1600Hz .....	104
Gambar 5.19. Bilangan gelombang propagasi bagian nyata (kiri) dan bagian imajiner (kanan) bahan Glaswool AB 4850 pada frekuensi 100 – 1600Hz.....	105
Gambar 5.20. Bilangan gelombang propagasi bagian nyata (kiri) dan bagian imajiner (kanan) bahan Glaswool AB 4850 pada frekuensi 500 – 8000Hz.....	105
Gambar 5.21. Bilangan gelombang propagasi bagian imajiner bahan Glaswool AB4850 dengan tebal 2 cm (kiri) dan 2,5 cm (kanan) pada tabung kecil.....	106
Gambar 5.22. Bilangan gelombang propagasi bagian imajiner bahan Glaswool AB4850 dengan tebal 1,6 cm pada tabung kecil.....	106
Gambar 5.23. Impedansi karakteristik bagian nyata (kiri) dan bagian imajiner (kanan) bahan Glaswool AB3250 pada frekuensi 100 – 1600Hz .....	107
Gambar 5.24. Impedansi karakteristik bagian nyata (kiri) dan bagian imajiner (kanan) bahan Glaswool AB4850 pada frekuensi 100 – 1600Hz .....	108
Gambar 5.25. Impedansi karakteristik bagian nyata (kiri) dan bagian imajiner (kanan) bahan Glaswool AB3250 pada frekuensi 500 – 8000Hz .....	108

Gambar 5.26. Impedansi karakteristik bagian nyata (kiri) dan bagian imajiner (kanan) bahan Glasswool AB4850 pada frekuensi 500 – 8000Hz .....	109
Gambar 5.27. Impedansi karakteristik ternormalisasi bagian nyata (kiri) dan bagian imajiner (kanan) bahan Glasswool AB3250 pada frekuensi 100 – 1600Hz .....	109
Gambar 5.28. Impedansi karakteristik ternormalisasi bagian nyata (kiri) dan bagian imajiner (kanan) bahan Glasswool AB4850 pada frekuensi 100 – 1600Hz .....	109
Gambar 5.29. Impedansi karakteristik ternormalisasi bagian nyata (kiri) dan bagian imajiner (kanan) bahan Glasswool AB3250 pada frekuensi 500 – 8000Hz .....	110
Gambar 5.30. Impedansi karakteristik ternormalisasi bagian nyata (kiri) dan bagian imajiner (kanan) bahan Glasswool AB4850 pada frekuensi 500 – 8000Hz .....	110
Gambar 5.31. Perbandingan hasil pengukuran koefisien serap bunyi dengan menggunakan sensor HP03 (jingga) dan tanpa menggunakan sensor HP03 (biru) .....	111
Gambar 5.32. Perbandingan hasil pengukuran koefisien serap bunyi dari perangkat TIS4M, 2 Mikrofon, dan B&K4206 .....	112





## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Diameter mikrofon berdasarkan batas maksimum frekuensi yang diukur .....	13
Tabel 2.2. Tabel selisih koefisien serapan bahan hasil pengukuran dengan metode tabung impedansi dan ruang kerdam.....	24
Tabel 4.1. Hasil penerapan sistem sensor suhu dan tekanan udara .....	83
Tabel 5.1. Perbandingan nilai koefisien serap bahan Rockwool ABR850.....	93
Tabel 5.2. Perbandingan nilai koefisien serap bahan Glaswool AB3250.....	93
Tabel 5.3. Perbandingan nilai koefisien serap bahan Glaswool AB4850.....	94
Tabel 5.4. Perbandingan nilai koefisien serap bahan Glaswool AB4825.....	94
Tabel 5.5. Selisih koefisien serapan bahan hasil pengukuran dengan metode tabung impedansi dan reverberation room.....	96
Tabel 5.6. Rincian harga TIS4M.....	113
Tabel 5.7. Rincian harga B&K 4206T .....	113

## DAFTAR SIMBOL

TIS4M	= Tabung Impedansi Sistem 4 Mikrofon
$h$	= Ketebalan lapisan batas
$\eta$	= Faktor kekentalan udara
$\lambda$	= Panjang gelombang (m)
$P_n$	= Tekanan bunyi yang diterima mikrofon ke-n (Pa)
A, B, C, D	= Amplitudo gelombang bunyi gelombang bidang
$x_1, x_2, x_3, x_4$	= Jarak mikrofon terhadap bahan (m)
$k$	= Bilangan gelombang (1/m)
$P _{x=0}$	= Tekanan bunyi pada permukaan depan bahan uji (Pa)
$P _{x=d}$	= Tekanan bunyi pada permukaan belakang bahan uji (Pa)
$V _{x=0}$	= Kecepatan partikel bunyi pada permukaan depan bahan uji (m/s)
$V _{x=d}$	= Kecepatan partikel bunyi pada permukaan belakang bahan uji (m/s)
$f_l$	= Batas frekuensi rendah kerja tabung impedansi (Hz)
$f$	= Frekuensi kerja tabung (Hz)

$f_u$	= Batas frekuensi tinggi kerja tabung impedansi (Hz)
$f_{CR}$	= Frekuensi kritis tabung (Hz)
$c$	= Kecepatan bunyi dalam tabung (m/s)
$d$	= Diameter tabung impedansi (m)
$d_m$	= Diameter mikrofon (m)
$s_{min}$	= Jarak minimum celah mikrofon (m)
$s_{max}$	= Jarak maksimum celah mikrofon (m)
$x_s$	= Jarak bahan uji terhadap mikrofon dua dan tiga (m)
$x_n$	= Jarak penyuar terhadap mikrofon pertama (m)
$A_v$	= Jumlah bati penguatan tegangan
$f_H$	= Frekuensi penggal tapis lolos bawah (Hz)
$f_L$	= Frekuensi penggal tapis lolos atas (Hz)
$f_s$	= Frekuensi resonansi <i>driver</i> (Hz)
$V_{AS}$	= Volume kelenturan <i>driver</i> (liter)
$Q_{TS}$	= Total faktor kualitas <i>driver</i>
$Q_{MS}$	= Faktor kualitas mekanik <i>driver</i>
$Q_{ES}$	= Faktor kualitas elektrik <i>driver</i>
$Q_{TC}$	= Total faktor kualitas kabinet tertutup
$Q_{MC}$	= Faktor kualitas mekanik kabinet tertutup
$Q_{EC}$	= Faktor kualitas elektrik kabinet tertutup
$\alpha$	= Rasio kelenturan kabinet
$V_{AB}$	= Volume kabinet tertutup (liter)

$f_c$	= Frekuensi resonansi kabinet tertutup (Hz)
$f_{LC}$	= Frekuensi penggal kabinet (Hz)
THD	= <i>Total Harmonic Distortion</i> (%)
$V_{1,2,3}$	= Tegangan pada frekuensi harmonik pertama, kedua, dan ketiga (V)
$V_n$	= Tegangan pada frekuensi harmonik ke-n (V)
$V_f$	= Tegangan pada frekuensi fundamental (V)
SNR	= <i>Signal Noise to Ratio</i> (dBV)
$V_{rms_k}$	= Tegangan rms keluaran penguat daya (Vrms)
$V_{rms_d}$	= Tegangan rms derau penguat daya (Vrms)
$dBV_K$	= Tegangan keluaran penguat daya (dBV)
$dBV_D$	= Tegangan derau penguat daya (dBV)
$T$	= Suhu udara (°C)
$\rho$	= Massa jenis udara (kg/m <sup>3</sup> )
$P$	= Tekanan udara (Pa)
$\alpha$	= Koefisien serap bunyi
$e_d$	= Tenaga bunyi datang menuju bahan (J/m <sup>3</sup> )
$e_p$	= Tenaga bunyi pantul bahan (J/m <sup>3</sup> )
$e$	= Tenaga akustik (J/m <sup>3</sup> )
$p$	= Tekanan gelombang bunyi (Pa)
$\rho_0$	= Kerapatan medium udara (kg/m <sup>3</sup> )



$p_d$	= Tekanan gelombang bunyi datang (Pa)
$p_p$	= Tekanan gelombang bunyi pantul (Pa)
$R$	= Tenaga akustik ( $\text{J/m}^3$ )
$B$	= Amplitudo gelombang bunyi pantul (Pa)
$A$	= Amplitudo gelombang bunyi datang (Pa)
$T$	= Koefisien transmisi
$k''$	= Bilangan gelombang propagasi bagian imajiner / tetapan atenuasi ( $1/\text{m}$ )
$R_T$	= Rerugi transmisi bahan (dB)
$k(\omega)$	= Bilangan gelombang propagasi ( $1/\text{m}$ )